

三维有限元数值模拟在宁夏大坝电厂 地震安全性评价中的应用

李步云 杨 斌 刘洪春 李 强 张向红

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文综合考虑了宁夏大坝电厂周围250 km范围内的地质、地球物理方面的有关资料,建立了三维有限元模型。利用该模型模拟了该区域的构造应力场,进而对大坝电厂厂址区及附近进行了地震危险性分析。在分析工作中结合安全度的定义提出了危险系数的概念及潜在震源区划分的定量-定性标志。经过分析,作者认为大坝电厂附近构造稳定性较好。

关键词: 有限元模拟 地震危险性评估 潜在震源区 三维模型 宁夏 大坝电厂

本文综合考虑了断层倾角及断层切割深度,进行了地壳分层,采取一些相应的划分单元的技巧,建立了较合理的三维有限元模型,通过数值模拟对宁夏大坝电厂厂址的地震危险性进行了分析。

1 三维有限元模型及有关参数

根据大坝电厂周围250 km范围内的地质和地球物理资料,建立了三维有限元模型,如图1所示。网格的划分主要体现了该区块体结构及断裂分布特征。对模型进行了合理的简化,以便于给定边界条件及易于计算。

模型内包括了大坝电厂附近分布的所有断裂,见表1。利用吴氏网求得各层面上断裂的分布^[7],并视断层和地壳为弹性材料。

该模型研究深度为40 km,约为震源深度的2倍。考虑到沉积层,纵向上将地壳分成三层,即0—6 km, 6—20

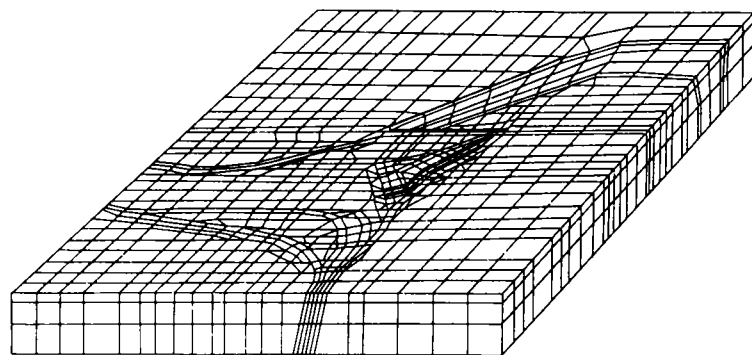


图1 立体模型示意图

Fig. 1 The sketch map of the space model.

km, 20—40 km。在平面上研究的范围为东经102°—109°, 北纬35.5°—42°, 东部以鄂尔多斯地块为界, 北部和西部以阿拉善地块为界, 南部以35.5°线为界。将模型共划分为2376个单

元,3388节点。

材料参数的选取主要参考了文献[1]和有关的资料,如地槽区和地台区的划分、沉积物的分布等,见表2。表3给出了模型的边界条件。

综上所述,该模型具有断层结构和层状结构,材料的分布具有不均匀性。在分析该模型中各断层单元的安全度时,作者把正应力、剪应力和危险系数统一起来考虑。

表1 模型内断裂参数

编号	断裂名称	宽度 (km)	倾向	倾角	切割深度 (km)
1	天祝—海原断裂带	10	SW	70°	40
2	古浪—同心断裂带	10	SW	60°	20
3	烟筒山断裂带	10	SW	60°	20
4	牛首山断裂带	10	SW	60°	40
5	鄂尔多斯西缘断裂带	10	W	70°	40
6	龙首山—图兰泰山断裂带	10	S—SE	90°	40
7	阿拉善左旗 NS 向断裂带	5	W	90°	20
8	狼山南缘弧型断裂带	10	SE	60°	20
9	河套盆地南缘 NE 向断裂带	10	SE	90°	20
10	河套盆地南缘 EW 向断裂带	10	NNE	70°	20
11	正谊关 EW 向断裂带	5	S	60°	20
12	贺兰山东麓断裂带	10	SE	70°	40
13	桌子山西麓 NS 断裂带	10	W	90°	20
14	三关口断裂带	5	NW	90°	6
15	平罗—银川断裂带	5	NW	90°	6
16	永安—吴忠断裂带	5	NW	90°	6
17	青铜峡近 NS 向断裂带	5	W	90°	6

表2 模型的材料参数

材料名称	弹性模量 E(10 ⁴ mPa)	密度 ρ(g/cm ³)	泊松比 ν
盆地外断层	2.5	2.3	0.30
盆地内断层	2.0	2.3	0.35
盆地沉积物	4.0	2.5	0.25
地台区花岗岩	9.0	2.7	0.15
地槽区花岗岩	6.0	2.7	0.26
玄武岩	15.0	2.8	0.28

2 区域构造应力场的三维有限元模拟

利用试算的办法,改变边界作用力或者边界约束条件,使模拟的构造应力场与晚第四纪及现代应力场相吻合。在此基础上,分析构造应力场的分布、断裂活动的性质及程度。图2详

细地描述了数值模拟方案,在模拟过程中,未考虑重力引起的应力场。

表3 模型边界条件

边界段号	边界条件
A—B	垂直于 AB 作用沿 Y 方向的均布力 $\sqrt{3}$ mPa
A—C	垂直于 AC 作用沿 X 方向的均布力 3mPa
D—E G—H E—F H—K K—L	在 0—20 km 深度的表面上,各点在平面内无位移,二维约束;在 40 km 的底面,三维约束
D—B F—G L—C	自由边界

在上述思路下进行了数值模拟,从图3可以看出地表位移场的特点:

(1)位移量从西南向北东递减。

(2)位移矢量的方向在西南角为北68°东,后转为北50°东,直到北45°东;在银川盆地内变为北35°东,吉兰泰为北27°东,河套盆地内为北43°东。由此可见,模型内质点均向北东方向运动,从南到北质点运动方向从北东东转为北东,直到北北东,这与青藏高原受到印度板块作用而向北东方向运动相吻合。

(3)银川盆地平均下沉量为6.41 cm,吉兰泰断陷带平均下沉量为9.09 cm,河套盆地平均下沉量为13.2 cm。据文献[1]可知,河套盆地的沉陷幅度在第四纪为2400 m,银川盆地为2000 m,吉兰泰为500 m。从相对量来说,二者比较吻合。

(4)海原—天祝断裂带、天景山断裂带等呈现左旋走滑兼逆冲的运动学特征。

从图4看出,在平面上其最大主压应力方向主要从北74°东到北5°东的范围内变化,只有局部地方的效果不太好,这是边界效应造成的。在深部主压应力方向变化不大,因此,只做出0—6 km 深度

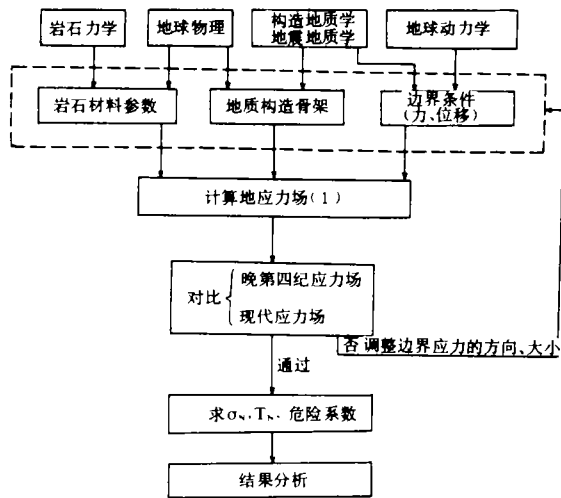


图2 数值模拟方案框图

Fig. 2 Block diagram of numerical simulation.

最大主压应力方向分布图(图4)。从图4可知,西海固地区的主压应力方向为北68°东左右;靖远地区为北49°东;古浪以北地区为北28°东;在中卫、中宁及景泰地区平均为北45°东;庆阳地区约为北75°东;在银川盆地约为北46°东,部分地区为北45°东,总体约为北45°东;吉兰泰为北25°东;河套盆地约为北22°东。上述结果与根据水系和震源机制解得到的结论吻合较好(表4)。

据文献[1]提供的数据,海原台的平均构造力为2.79 mPa,银川盆地自全新世以来的平均剪应力为2.32 mPa,这和模拟得到的平面最大剪应力达到几兆帕在数量级上是接近的。

表4 由水系和震源机制结果得到主压应力方向与模拟结果的比较

地名	银川	吉兰泰	阿拉善左旗	西海固	庆阳地区
水系	N35°E	N35°E	N22.5°E	N65°E	N75°E
震源机制	N45°E	N30°E	N12°E	N63.6°E	
模拟结果	N45°E	N25°E	N28°E	N68°E	N75°E

利用模型模拟计算出的位移场、平面最大主压应力方向及平面最大剪应力的特征,基本反映出研究区的地壳运动形态和应力场特征,与根据地质资料得到的结果相吻合,由此可见,模拟得到的应力场是一个较符合实际情况的构造应力场。

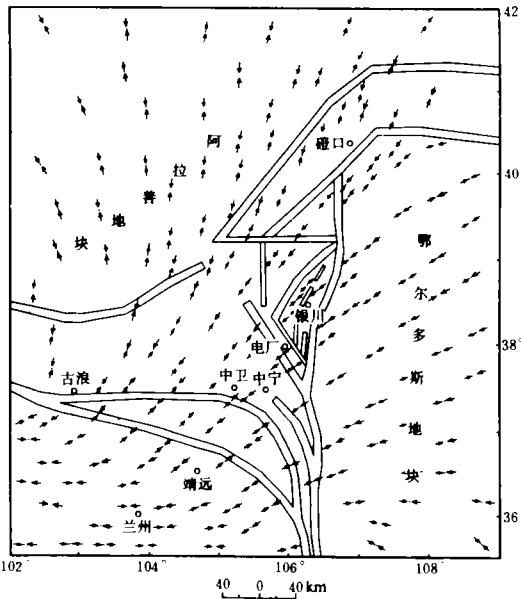
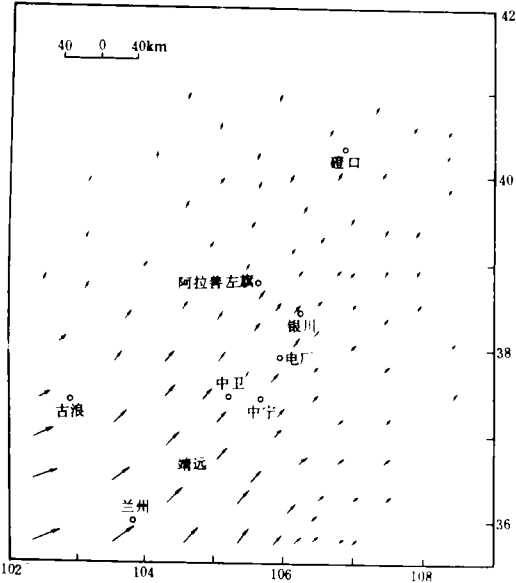


图3 地表水平位移矢量分布
Fig. 3 Distribution of horizontal displacement vectors on the ground.

图4 地表平面最大主压应力方向分布
Fig. 4 The distribution of plane maximum principal stress directions on the ground.

3 大坝电厂安全性评价

本文借用安全度的定义,推导并定义危险系数,以此来描述断裂活动的程度,这样可以有效地把空间应力场统一在断层面上的正应力、剪应力及危险系数三个指标当中。自然界中的断裂带主要是脆性剪切断裂带,其活动方式符合库仑剪破裂准则:

$$\tau=\tau_0+\mu\sigma_N$$
 (压应力为正)

在模拟过程中,岩石被看作线弹性体,滑动问题可以看成滑块问题,即完全靠摩擦力来

抵抗剪应力,且不允许出现垂直于断层的拉应力。当 $\sigma_N=0$ 时, $\tau_0=0$, 即不考虑粘结强度。王仁等在研究华北地区地震迁移规律时利用静动摩擦的概念,给出了安全度的定义^[2];安全度 $G=(\text{摩擦阻力}-\text{剪应力})/\text{摩擦阻力}$,即

$$G=(\mu\sigma_N-\tau_N)/\mu\sigma_N$$

化简得:

$$G=1-\frac{1}{\mu}\cdot\frac{\tau_N}{\sigma_N}$$

定义危险系数

$$K=\tau_N/\sigma_N$$

其中, τ_0 为岩石的粘结强度, σ_N 为断层面上的正应力, τ_N 为断层面上的剪应力, μ 为摩擦系数。

在花岗岩面或或沉积岩面之间存在一定厚度的断层的滑动问题,可以看成是花岗岩面或沉积岩面之间的滑动,花岗岩面摩擦系数为 0.5—0.7^[5]或 0.6—2.7^[6],且粗磨面摩擦系数为 0.6—0.64^[6]。王仁等在模拟断层的滑动问题时,取摩擦系数为 0.4—0.75^{[8][2]},取得了较好的效果。另外,沉积岩面摩擦系数在相似岩面下要小一些,综合考虑,取研究区断面的摩擦系数为 0.4—0.75。

对于空间应力单元来说,断层单元的法向矢量 N 的方向余弦 $\cos(N, x)=l, \cos(N, y)=m, \cos(N, z)=n$, 则:

$$\sigma_N=lX_N+mY_N+nZ_N$$

$$\tau_N=X_N^2+Y_N^2+Z_N^2-\sigma_N^2$$

其中 $X_N=l\sigma_x+m\tau_{xy}+n\tau_{xz}, Y_N=m\sigma_y+n\tau_{xy}+l\tau_{xz}, Z_N=n\sigma_z+l\tau_{xz}+m\tau_{yz}$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ 和 τ_{xz} 为断层单元上的 6 个应力分量^[3], 从以上公式可以求得 K, σ_N 和 τ_N 。

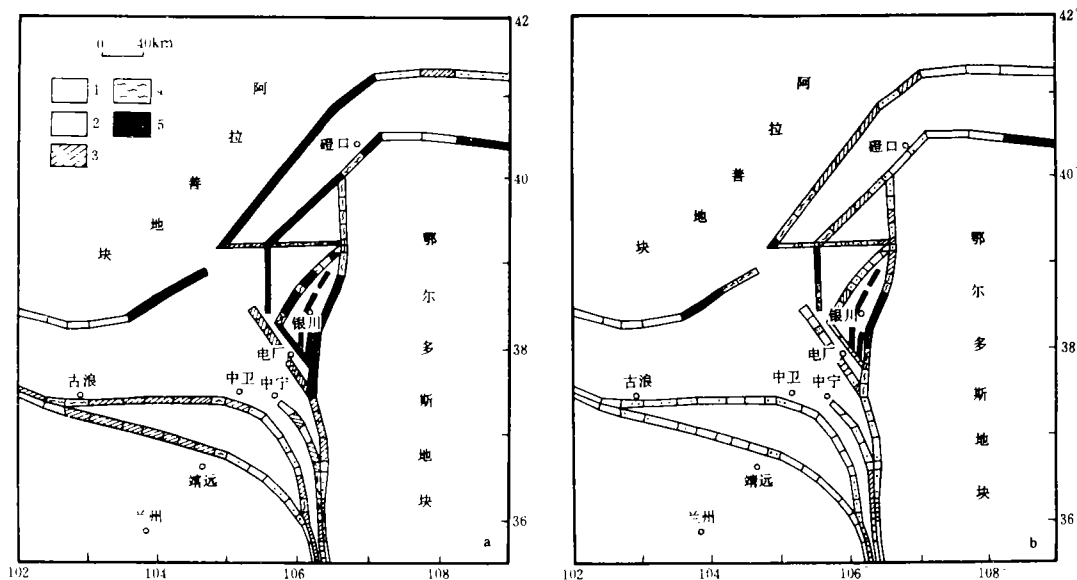


图5 断裂带危险系数分布

a. 0—6 km; b. 6—20km;

1. $K<0.4$; 2. $K=0.4-0.5$; 3. $K=0.5-0.6$; 4. $K=0.6-0.75$; 5. $K>0.75$

Fig. 5 Distribution of danger coefficients along fractured zone.

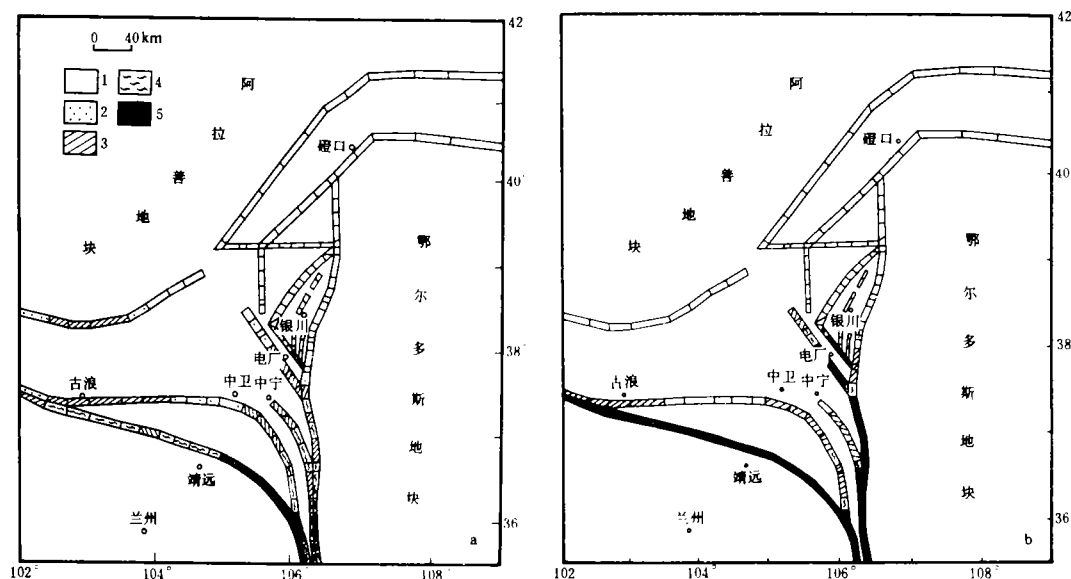


图6 断裂带内正应力分布(单位: $\times 10^5 \text{Pa}$)

a. 0—6 km; b. 6—20 km;

1. $\sigma_n < 4$; 2. $\sigma_n = 4-6$; 3. $\sigma_n = 6-8$; 4. $\sigma_n = 8-10$; 5. $\sigma_n > 10$

Fig. 6 Distribution of normal stress in fractured zone.

对于确定的断层段来说, μ 是一个定值, 但由于 μ 的复杂性, 很难实地测量, 因此本文结合模拟的应力分量, 在 μ 的取值范围内对断层活动性进行一定程度的估计。

从安全度的定义可以看出, 当 $G \leq 0$ 时, $K \geq \mu$, 断层处于滑动状态; 当 $G > 0$ 时, $K < \mu$, 断层处于闭锁状态。由此可见, 当 $K < 0.4$ 时, 断层闭锁; 当 $K \geq 0.75$ 时, 断层活动; 当 K 介于 0.4 到 0.75 之间时, 断层单元处于闭锁或者活动状态。

对于断层范围较大的走滑或闭锁, 则认为其危险性不高。结合文献[4], 确定潜在震源的划分原则如下:

(1) 大范围 $K \geq 0.75$ 或 $K < 0.4$ 的断裂带, 为 IV 级潜在震源区。

(2) 对于第一层(表层)的断层单元来说, 在 $K \geq 0.4$ 的前提下, 断层滑动的方式可分为 4 种: ①断层面上的剪应力较高, 正应力也较高, 有利于积累应变能, 容易以强震活动释放能量, 为 I 级潜在震源区; ②断层面上的剪应力较小, 正应力较高, 为 II 级潜在震源区; ③断层面上的剪应力较高, 但正应力较小, 不利于积累应变能, 易以小震释放能量, 为 III 级潜在震源区; ④断层面上的剪应力和正应力都小, 且相邻单元为闭锁单元, 可视为 III 级潜在震源区, 无闭锁可视为 IV 级潜在震源区。

(3) 对于第二层(6—20 km)的断层, 在上述原则下, 如果上层活动而在该层不活动, 且正应力和剪应力值均较高, 潜在震源区的危险性加一级; 对剪应力或正应力较高, 且危险系数较高的单元, 其潜在震源区的危险性增加一级; 对于表层活动且在 6—20 km 深度内也活动, 有相邻闭锁单元存在, 参考危险系数、剪应力及正应力, 其潜在震源区的危险性可增加一级。

(4)对于危险系数 $K < 0.4$ 且深部活动但剪应力和正应力较小的单元,可视为Ⅳ级潜在震源区。

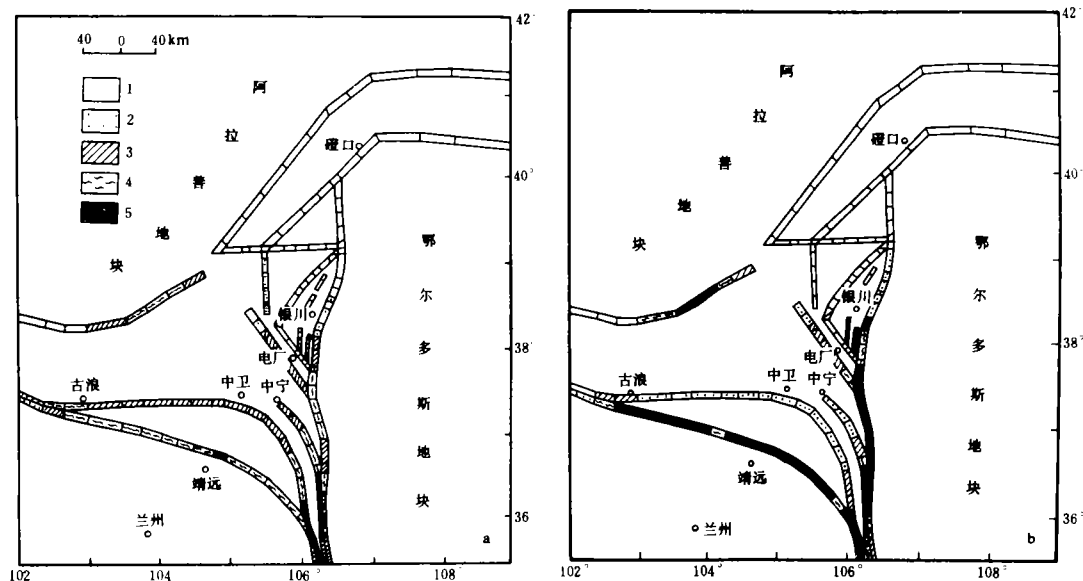


图7 断裂带内剪应力分布(单位: $\times 10^5 \text{Pa}$)

a. 0—6 km; b. 6—20 km;
1. $\tau < 2$; 2. $\tau = 2-3$; 3. $\tau = 3-4$; 4. $\tau = 4-15$; 5. $\tau > 5$

Fig. 7 Distribution of shear stress in fractured zone.

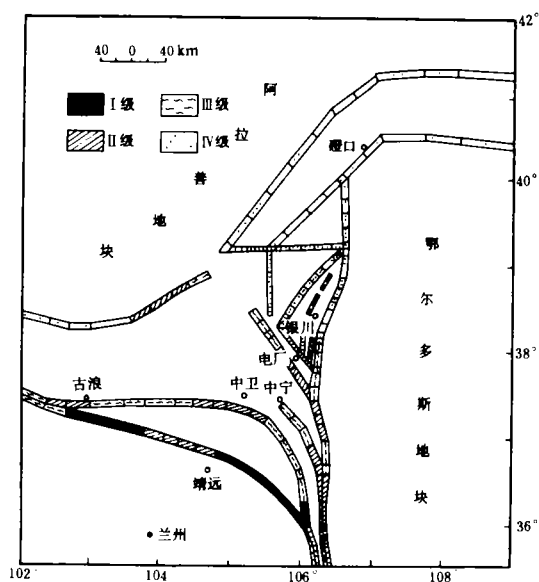


图8 断裂带潜在震源区分布

Fig. 8 Distribution of potential source region in fractured zone.

综合以上4点,结合图5—8,做出了大坝电厂周围250 km 范围内断裂带的潜在震源分布图(图8),其中Ⅰ、Ⅱ级潜在震源区有发生中强地震的危险性,Ⅲ级潜在震源区有发生小震的危险性,Ⅳ级潜在震源区为较安全区。主要结论如下:

(1)在天祝—景泰—海原—固原断裂带上,有发生中强地震的可能性,属Ⅰ、Ⅱ级潜在震源区。

(2)在古浪—同心断裂带上的中卫附近段及古浪附近段有发生中等地震的可能性,属Ⅱ级潜在震源区,其余为Ⅲ级潜在震源区,有可能发生较小的地震。

(3)在烟筒山断裂和鄂尔多斯西缘断裂带交汇的附近区域段有可能发生中等强度的地震。

(4)在龙首山—图兰泰山前断裂带的青山头南部附近为Ⅱ级潜在震源区,有发

生中等强度地震的危险性。

(5)牛首山断裂带属于Ⅱ—Ⅲ级潜在震源区,有发生中小地震的可能性。

(6)其余断裂的活动程度均属于Ⅲ—Ⅳ级潜在震源区,危险性不大。

综上所述,大坝电厂位于Ⅱ—Ⅳ级潜在震源区内,其附近断裂的活动性不大,危险性不太高,仅有发生中小地震的可能性。

本文的研究仅是宁夏大坝电厂地震安全性评价工作中的一部分,实际评价该地区的地震危险性,还需要用多种方法综合分析。

(本文1993年12月23日收到)

参考文献

- 1 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京:地震出版社,1988
- 2 王仁,何国琦,等. 华北地区地震迁移规律的数学模拟. 地震学报,1980, 2 (1)
- 3 徐芝纶. 弹性力学(上册). 北京:高等教育出版社,1990
- 4 宋惠珍,等. 地震危险区划中的数值模拟. 中国地震,1989, 5(2)
- 5 陈顺. 地壳岩石的力学性能——理论基础与实验方法. 北京:地震出版社,1988
- 6 安欣. 构造应力场. 北京:地震出版社,1992
- 7 李步云,昌马地震应力场及发展机制研究. 西北地震学报,1993,16(3)
- 8 Jaeger J C and N G W Cook. Fundamentals of Rock Mechanics. London:Methuen and Co, 1976

AN APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION OF 3-D FINITE ELEMENT TO EVALUATION OF SEISMIC SAFETY OF THE DABA POWER PLANT, NINGXIA HUI AUTONOMOUS REGION

Li Buyun, Yang Bin, Liu Hongchun, Li Qiang and Zhang Xianghong

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

This paper considers comprehensively concerned data of geology and geophysics within 250 km around the Daba power plant and establishes a 3-D finite element model. The structural stress field in the region is simulated by the model and then the seismic hazard there is analyzed. Danger coefficient and quantitative and qualitative differentiation signs of the potential source region are advanced according to definition of seismic safety. It is considered that the structural stability is better near the Daba power plant.

Key words: Finite element modeling, Seismic risk evaluation, Potential earthquake zone, Three dimensional model, Ningxia, Daba power plant